Zeitschrift: Schweizerische Bauzeitung
Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine
Band: 91 (1973)
Heft: 37: Dolderbahn

Artikel: Die Dolderbahn als Zahnradbahn
Autor: Wild, Adolf
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-71990

Nutzungsbedingungen
Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation
L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use
The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 13.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Die Dolderbahn als Zahnradbahn

DK 625.33

Von **A. Wild**, Bern

Zahnstangen im Eisenbahngeleise

Schon früh in der Eisenbahngeschichte stösst man auf den Gedanken der Zahnstangen im Geleise, mit deren Hilfe sich die Lokomotiven vorwärts und aufwärts bewegen können. Ursprünglich sollte auch auf der Horizontalen die Zahnstange für die Fortbewegung beigezogen werden, weil angeblich die Adhäsion zwischen den Lokomotivrädern und den Schienen nicht genüge, um Anhängelasten zu schleppen. Mit diesem Vorurteil hat denn auch *Blenkinshop* im Jahre 1812 die erste Zahnradlokomotive der Welt gebaut. Kurz danach wurde der Nachweis erbracht, dass die Adhäsion zwischen glatten Rädern und Schienen genüge, um ganze Züge über gewisse Steigungen zu bringen. Mit dem Bau von grösseren Adhäsionslokomotiven begann die stürmische Entwicklung der Eisenbahn in Europa und in Amerika. Das Überwinden der Steigungen war jedoch nach wie vor ein Problem, und es zeigte sich, dass die Leistungsfähigkeit einer Eisenbahn zum grossen Teil von den zu überwindenden Steigungen abhing. Je grösser die Steigung, um so geringer wurde die Anhängelast und um so schlechter die Leistungsfähigkeit. Die technischen und wirtschaftlichen Überlegungen haben dazu geführt, dass beim Bau von Eisenbahnen Steigungen von rund 30‰ nicht überschritten wurden. So haben zum Beispiel der Gotthard und der Lötschberg eine Steigung von 27‰. Die Grenze der zulässigen Steigung wird grundsätzlich durch den Reibwert zwischen Rad und Schiene bestimmt, wobei die ungünstigsten Verhältnisse zu berücksichtigen sind. Bei Einschaltung eines genügenden Sicherheitsfaktors ist eine Steigung von 70‰ die obere Grenze des Verantwortbaren. Darüber hört der Adhäsionsbetrieb auf (eine Steigung von 70‰ hat zum Beispiel die Uetlibergbahn in Zürich).

Die Idee, dass Zahnradlokomotiven auf Steigungen von 30 bis 70‰ grössere Lasten transportieren könnten als Adhäsionslokomotiven und dass schliesslich Zahnradlokomotiven auch in Steigungen über dem Adhäsionsbereich eingesetzt werden könnten, war immer vorhanden und wurde auch nie fallengelassen. So wurden um 1850 in Amerika Lokomotiven eingesetzt, die auf den Horizontalstrecken als Adhäsionslokomotiven und auf Steigungen bis 60‰ als Zahnradlokomotiven funktionierten (Madison–Indianapolis-Bahn von 1847–1868). Auch der Vorstoss in Steigungen über dem Adhäsionsbereich wurde in Amerika unternommen, und die Zahnradbahn auf den Mount Washington mit einer mittleren Steigung von 240‰ wurde im Jahre 1869 in Betrieb genommen. Die grösste Steigung dieser Bahn betrug 377‰. Bereits zwei Jahre später konnte die von Riggenbach erbaute Vitznau–Rigi-Bahn als erste Zahnradbahn in der Schweiz mit einer Steigung von 250‰ in Betrieb genommen werden. Seit damals sind in der Schweiz 22 gemischte Zahnrad- und Adhäsionsbahnen sowie 17 reine Zahnradbahnen in Betrieb genommen worden. Die Dolderbahn in Zürich ist somit die 18. reine Zahnradbahn. Der grösste Teil der erwähnten Bahnen, die auf ein Alter von bis zu 100 Jahren zurückblicken können, ist heute noch in Betrieb (Bild 1).

Die Zahnstangensysteme in der Schweiz

Die erste in der Schweiz angewandte Zahnstange war diejenige von *Riggenbach* bei der Rigibahn. Es handelte sich um die sogenannte Leiterzahnstange, bei der trapezförmige Zähne zwischen zwei U-Profilen eingenietet werden. Das System hat sich in bezug auf Lebensdauer und Sicherheit bewährt. So können heute noch solche Zahnstangen von respektablem Alter angetroffen werden. Die Riggenbachsche Leiterzahnstange wurde mit verschiedenen Abänderungen immer wieder angewandt. In der Schweiz wurde eine Zahnteilung von 100 mm beibehalten. Nachteilig kann der Leiterzahnstange angelastet werden, dass sie sich beim Einbau in Geleisekurven nicht verbiegen lässt und dass im Winter der in die Zahnlücken eingepresste Schnee zu Vereisungen führt. Der zuletzt genannte Nachteil war allerdings zur Bauzeit der Bergbahnen nicht bekannt, weil damals die Zahnradbahnen im Winter eingestellt wurden.

Auf der Suche nach einer weniger kostspieligen Zahnstange ging *Roman Abt* neue Wege, indem er verzahnte Stahllamellen einsetzte. Bei einer Zahnteilung von 120 mm wurden 2 Lamellen nebeneinander mit einer Versetzung von 60 mm vorgesehen.

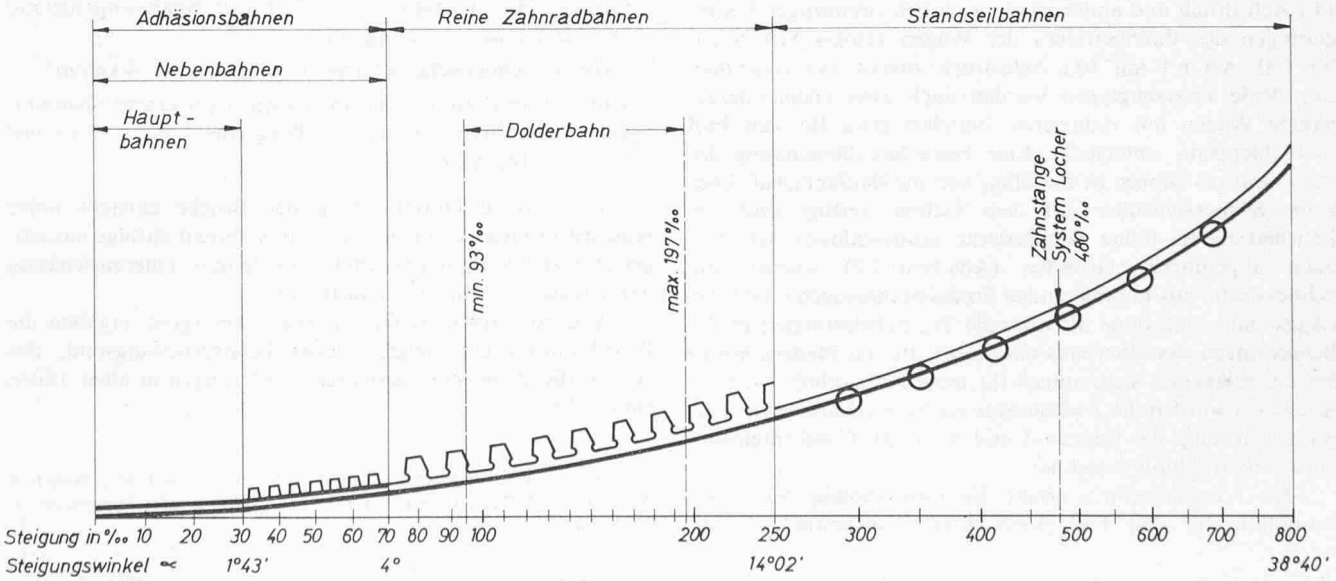


Bild 1. Einteilung der Eisenbahnen in Abhängigkeit der Steigung

Beim Bau der Jungfrau-Bahn liess *Emil Viktor Strub* die Zahnstange aus einer Keilkopfschiene heraus arbeiten. Die Schiene konnte mit ihrem Fuss auf einfache Art im Geleise befestigt werden, und trotz ihres geringen Gewichtes waren die aus dem Schienenkopf herausgearbeiteten Zähne verhältnismässig breit. Die Strubsche Zahnstange kann beim Verlegen jedem Krümmungsradius angepasst werden. Sie eignet sich für den Winterbetrieb, weil Schnee und Eis sich nicht zwischen den Zähnen halten können. Die aus einer Schiene verfertigte Zahnstange System Strub vereinigt im Prinzip die Vorteile der Systeme Riggenbach und Abt, ohne deren Nachteile aufzuweisen. Die Fabrikation der Strubschen Zahnstangen wurde von Anfang an von den von Rollschen Eisenwerken übernommen. Zu dieser Firma hatte Strub zeit seines Lebens ein enges Verhältnis (Bild 2).

Die Beschaffung der Walzprofile für die Herstellung der Strubschen Zahnstangen wurde seit dem letzten Kriege besonders für kleine Mengen praktisch unmöglich. Als Ersatz bot sich die seit langem bekannte Lamellenzahnstange an, die in diesem Falle jedoch als Einfachlamelle so zu bemessen war, dass sie die Zahnkräfte, ähnlich wie die Strubsche Zahnstange, übernehmen konnte.

Die Zahnstangen der Dolderbahn

Beim Bau der Dolder Zahnradbahn war somit die Wahl des Zahnstangensystems mit der Einfachlamelle vorgezeichnet. Die Lieferung erfolgte durch die Firma von Roll, bei der für die Fabrikation solcher Zahnstangen die modernsten Einrichtungen bestehen (Bild 3).

Das zuverlässige und robuste System der einfachen Lamelle bietet folgende Vorteile:

- billigstes System aller Zahnstangen
- der Zahnstangenquerschnitt kann den Zahndrücken, welche von der Steigung abhängig sind, angepasst werden, wodurch Material eingespart wird
- für das Ausgangsmaterial von rechteckigem Querschnitt kann die am besten geeignete Legierung gewählt werden
- die Lamellenzahnstangen können beim Verlegen jedem Krümmungsradius angepasst werden

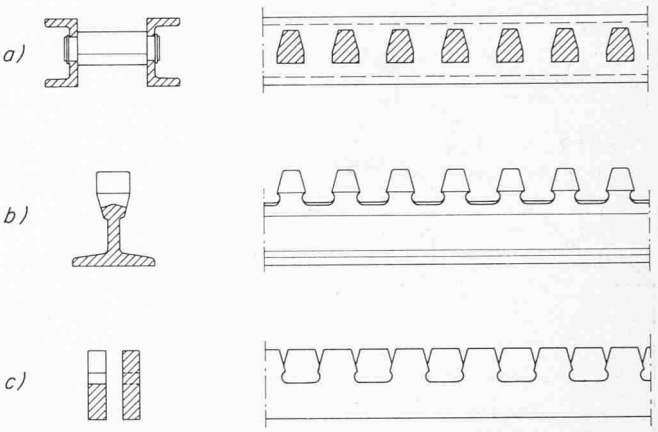


Bild 2. Zahnstangen nach den Systemen a) Riggenbach, b) Strub und c) Abt

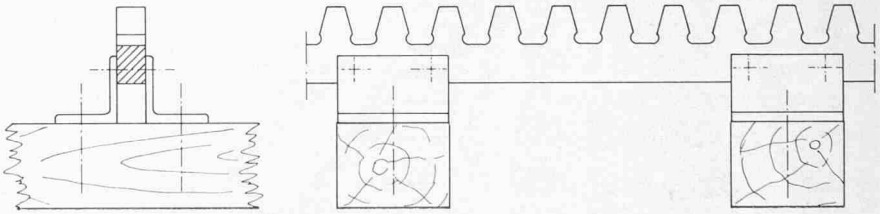
- bei Schnee und Eis ist keine Beeinträchtigung des Zahnstangenbetriebes zu befürchten
- die Zahnstangenweichen können mit denselben Lamellen ausgerüstet werden.

Die Triebzahnräder sitzen allgemein auf den Laufachsen der Fahrzeuge. Bei neuen, nicht abgenützten Radreifen werden somit die Zahnräder die höchste Lage gegenüber der Zahnstange einnehmen. Bei Abnützung der Radreifen senkt sich das Zahnrad um die Grösse *d*. Bei der maximal zulässigen Radreifenabnützung wird die tiefste Stellung des Zahnrades in der Zahnstange erreicht. Bei den meisten Zahnradbahnen, so auch bei der Dolderbahn, wird die maximale Abnützung der Radreifen und damit die grösstmögliche Absenkung des Zahnrades d_{max} mit 12 mm angenommen (Bild 4).

Dank der Evolventenverzahnung, bei der die Zahnstange mit geraden Flanken versehen wird, kann diese allmähliche Absenkung ohne Nachteile in Kauf genommen werden.

Ein für die Sicherheit der Zahnradbahnen wichtiges Mass ist die Eindringlänge *L*, die im vorliegenden Fall im Neuzustand rund 330 mm (3,3 *t*) beträgt. Bei maximaler Radreifen-

Bild 3. Lamellenzahnstange der Dolderbahn



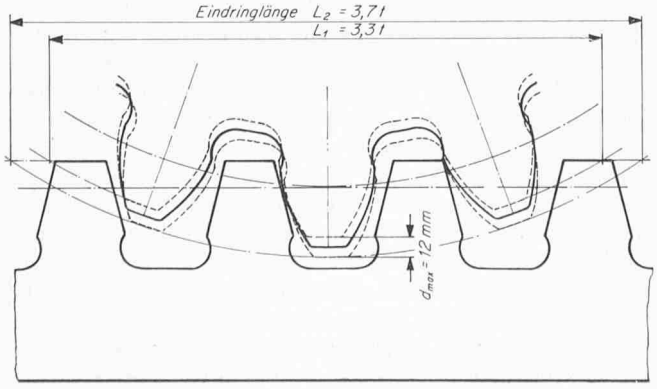


Bild 4. Das Zahnrad sitzt auf der Laufradachse, und infolge Abnützung der Laufräder senkt sich das Zahnrad ab; *t* Zahnabstand

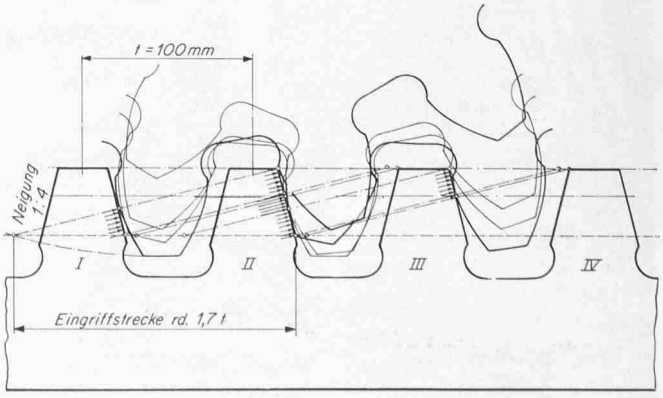


Bild 5. Eingriff des Zahnrades in die Zahnstange

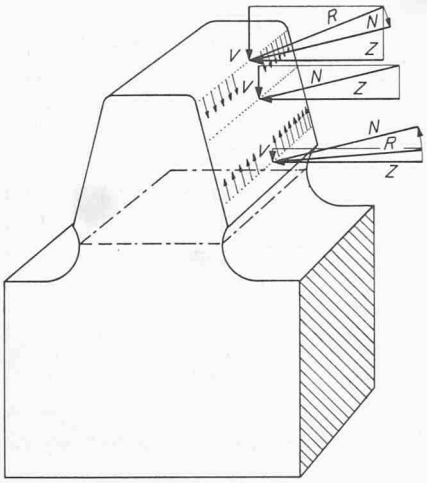
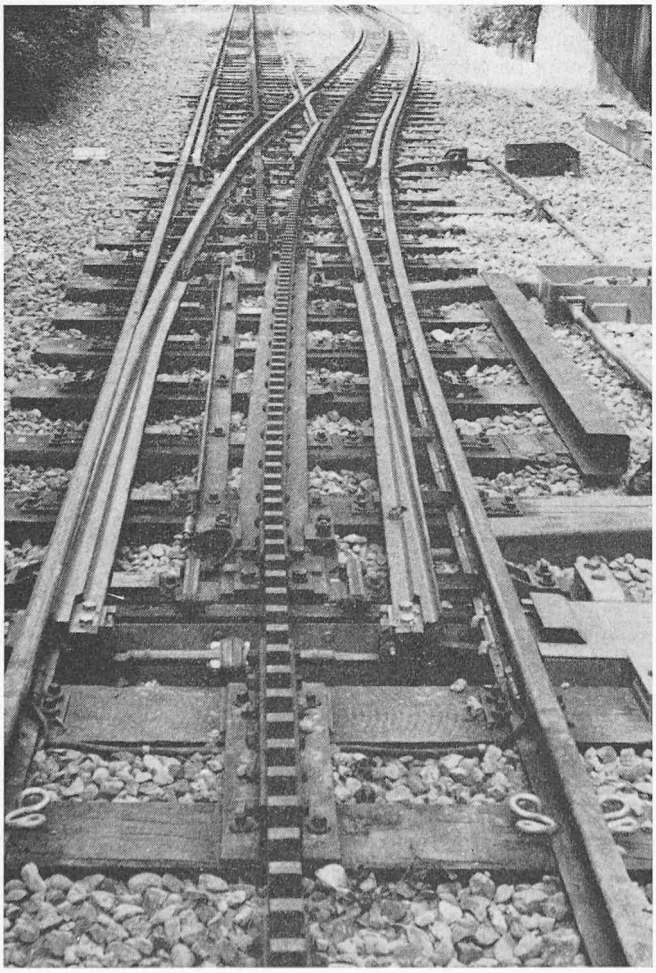


Bild 6. Kräfte an der Zahnstange

Die durch die Zahnflankenneigung bedingte Vertikalkraft V wird im oberen Zahnteil durch eine nach unten wirkende Reibkraft verstärkt, im unteren Zahnteil jedoch durch eine nach oben wirkende Reibkraft verringert

N = Normaldruck des Zahnes
Z = Zugkraft parallel zur Zahnstange
R = Resultierende aus Normaldruck und Reibungskomponente $\mu \cdot N$
V = Vertikalkraft senkrecht auf die Zahnstange wirkend.

Bild 7. Zahnstangenweiche in Federzungenbauart mit Spitzenverschluss und elektromotorischem Antrieb



abnützung, bzw. bei maximaler Zahnradabsenkung, steigt die Eindringlänge auf rund 370 mm (3,7 t). Der Sicherheitsfaktor steigt somit von 3,3 auf 3,7, wobei grundsätzlich ein Minimalfaktor von 2,15 verlangt wird.

Um einen kontinuierlichen Zahneingriff zu gewährleisten, muss zumindest ein Zahn jederzeit im Eingriff sein. Die Eingriffsstrecke wird dabei gleich der Teilung und die Eingriffsdauer gleich 1. Eine ungenügende Eingriffsdauer hat stossartiges Eingreifen der Zähne zur Folge, was zu Schlägen und Abnützungen führt. Man ist bemüht, eine grosse Eingriffsdauer vorzusehen, um jedes Risiko des unregelmässigen Eingriffs zu vermeiden und auch, um mehr als nur einen Zahn gleichzeitig im Eingriff zu haben. Bei gleichzeitigem Eingriff mehrerer Zähne wird die Biegebeanspruchung der Zähne verkleinert und die Flächenpressung auf den Zahnflanken verringert.

Bei den Zahnstangen der Dolderbahn beträgt die Eingriffsstrecke rund 1,7 t. Gemäss Bild 5 ergibt sich dabei, dass z.B. der Zahn II nur in seinem Mittelteil den vollen Zahndruck aufzunehmen hat. Die obere Randpartie des Zahnes II erhält ungefähr die Hälfte des Zahndruckes, weil gleichzeitig Zahn I im Eingriff ist. Bei der unteren Randpartie des Zahnes II ist bereits der Eingriff beim Zahn III vorhanden. Diese Entlastung der Zahnflanken wirkt sich besonders günstig aus, weil zwischen den Zahnflanken des Zahnrades und der Zahnstange neben der Abrollbewegung eine ausgeprägte Gleitbewegung vorhanden ist. Im oberen Teil des Zahnstangenzahnes gleitet das Zahnrad nach unten, und es entsteht dadurch eine nach unten wirkende Reibkraft. Im unteren Teil des Zahnradzahnes herrscht eine nach oben wirkende Reibkraft. Die nach unten wirkende Reibkraft wird zusammen mit der Vertikalkomponente des Zahndruckes dem Aufsteigen des Zahnrades förderlich sein. Aus dieser Überlegung heraus ist der Flankenwinkel der Zahnstange festzulegen. Bei der Dolderbahn ist eine Flankenneigung von 1:4 vorhanden.

Die erwähnten Kräfte sind auch bei der Festigkeitsrechnung der Zahnstange zugrunde zu legen. Die oben erwähnte Zahndruckreduktion infolge Eingriffsüberdeckung wird nicht berücksichtigt, weil anzunehmen ist, dass infolge ungleicher Abnützung eine gleichmässige Lastverteilung auf verschiedene Zähne nicht gegeben ist. Ausgehend von den vom Fahrzeug her gegebenen Zahndrücken sind die Zahnstangenzähne auf Biegespannungen zu untersuchen. Die nach unten wirkenden Kräfte sind für die Bemessung des Zahnstangenquerschnittes massgebend (Bild 6).

Bei lückenlos verschweissten Zahnstangen, was bei der Dolderbahn nicht der Fall ist, sind die infolge Wärmedehnung entstehenden überlagerten Zug- und Druckspannungen zu berücksichtigen. Zu beachten ist ferner, dass z.B. bei einer Geschwindigkeit von 18 km/h und bei einer Zahnteilung von 100 mm die Zahneingriffe sich in Intervallen von einer Fünfzigstelsekunde folgen. In den gleichen Zeiteinheiten müssen sich die Übertragungskräfte den Zahnstangenzähnen mitteilen. Aus dieser Überlegung heraus wird man die Dauerfestigkeit des Zahnstangenmaterials in die Rechnung einsetzen.

Die Weichen der Ausweichstellen wurden mit denselben Zahnstangen ausgerüstet wie das Geleise und sind auf Holzschwellen verlegt. Es handelt sich um zwei einfache Weichen 1:8, wovon eine links und eine rechts abzweigend ist. Der Radius des abzweigenden Stranges beträgt 100 m. Im Gegensatz zu den früher üblichen Gelenkzungenkonstruktionen wurden die Weichen der Dolderbahn in Federzungenkonstruktion ausgeführt. Bei dieser Bauart bewegen sich die Zungen nicht um einen Drehpunkt, sondern die Elastizität der Zungenschienen wird ausgenützt, um das Öffnen und Schliessen der Zungen zu ermöglichen. Beim Umstellen der Weichenzungen werden gleichzeitig auch die beweglichen Teile der Zahnstangen in die richtige Lage gebracht. Über Gestänge

und Umlenkhebel wirken elektromotorische Weichenantriebe. Damit die Weichenzungen und auch die beweglichen Zahnstangenteile einwandfrei in der jeweiligen Endlage bleiben, sind Spitzenverschlüsse eingebaut. Diese Spitzenverschlüsse bewirken eine Verriegelung der beweglichen Teile, und sie bieten eine zusätzliche Sicherheit (Bild 6).

In den letzten Jahren hat sich die Ansicht durchgesetzt, dass dem öffentlichen Verkehr in den Städten mit ihren Agglomerationsräumen die Priorität einzuräumen sei. Der schienengebundene Verkehr erlebt eine Renaissance, und es zeigt sich immer wieder, dass eben eine Bahn das rationellste und zuverlässigste Massentransportmittel ist. In das moderne Verkehrssystem von heute und auch von morgen, mit Schnellbahnen, Untergrundbahnen und Strassenbahnen usw., fügt sich die Zahnradbahn harmonisch ein. Wenn z.B. Stadtteile oder Siedlungsgebiete von einem gewissen Höhenunterschied zu erschliessen sind, kann eine kurze, direkte Zahnradbahn die Verkehrsprobleme elegant lösen. So wäre z.B. die Zahnradbahn Lausanne–Ouchy nicht mehr wegzudenken. Lyon baut eine Zahnrad-Metro, die von der im Rhonetal gelegenen Metrostation unterirdisch auf das Hochplateau Croix-Rousse führt und von dort über Tage als Adhäsionsstrecke weitere Stadtteile erschliesst. Eine ähnliche Zahnradbahn mit unterirdischer Einführung in eine Metrostation wird in Paris geplant.

Zürich mit seiner Dolder-Zahnradbahn ist somit auf dem richtigen Weg. Es hat für die Zukunft den richtigen Zug erwischt.

Adresse des Verfassers: *Adolf Wild*, Ing. von Roll AG, Fabrikstr. 2, 3012 Bern

Die Fahrleitungsanlage

DK 625.33:621.332.3

Von **R. Häny**, Zürich

Zusammenfassung

Die neuen Triebfahrzeuge erhalten ihre Energie durch Schiene und Oberleitung zugeführt. Die Stromabnahme von der Oberleitung besorgt je Wagen ein Scherenstromabnehmer (Pantograph), der auf der leicht abfallenden Frontpartie des Wagendaches aufgestellt ist.

Als Energiequelle dient eine Gleichrichteranlage 600 V, die im Untergeschoss der Mittelstation untergebracht ist. Eine Hilfseinspeisung ab VBZ-Netz 600 V= ist für später im Römerhof vorgesehen und kann dann im Falle einer Störung in der bahneigenen Stromversorgung angezapft werden.

Mehrere Strassenüberführungen mit extrem niedrigen Durchlasshöhen gaben zu Beginn der Erneuerungsstudien dazu Anlass, an Stelle der Oberleitung eine in die Gleisebene verlegte Stromschiene (wie U-Bahn) zu planen. Die Kosten einer solchen Anlage mit zuverlässigem Berührungsschutz liegen aber dermassen hoch, dass man diese Idee fallenliess und dafür die Anpassungen der bestehenden Überbauten an das neue Wagenbegrenzungsprofil in Kauf nahm.

Die Gegebenheiten der überführten Strassen einerseits und das Bahntrassee anderseits setzten den Anpassungsmöglichkeiten bestimmte Grenzen, die den Wagen- wie auch den Leitungsbauer vor keine leicht zu lösende Aufgabe stellten.

Das Fahrleitungssystem

Übereinstimmend mit dem Aufhängungssystem der Zürcher Verkehrsbetriebe ist der Fahrdraht der Dolderbahn elastisch, an kurzen Schrägpendeln aufgehängt. Besondere Konstruktionen mussten bei Überführungen und in den Stationen angewandt werden. Nachstehend sei kurz der Sinn und Zweck der elastischen Aufhängung näher beschrieben.

Dem aufmerksamen Beobachter ist es sicher schon aufgefallen, dass in den Städten des In- und Auslandes die Fahrdrähte von Tram- oder Trolleybus an schrägstehenden Hängedrähten befestigt sind. Er mag sich gefragt haben, warum die Aufhängung schief steht und nicht vertikal. Die Antwort ist einfach: Solche Pendel vermitteln der Leitung auf einfachste Art eine gleichmässige Elastizität, ohne die das Beschleifen des Fahrdrahtes durch einen Wanderkontakt nicht zufriedenstellend funktioniert. Die schrägen Hänger ziehen den Fahrdraht bei jedem Stützpunkt um 20 bis 30 cm aus der Mittelachse. Dies ist erwünscht, da sonst der Fahrdraht immer auf dem gleichen Schleifstückpunkt laufen würde und dort eine Rille hinterliesse. Der so entstehende kleine Horizontalwinkel am Stützpunkt ergibt dank der Zugspannung im Fahrdraht eine horizontale Kraftkomponente, den sogenannten Winkelzug. Zusammen mit dem Fahrdrahtgewicht (als Vertikalkomponente) erhalten wir eine resultierende Kraftwirkung, die sich in der Schieflage des Hängedrahtes dokumentiert. Ist z.B. bei einer Spannweite von 30 m das Fahrdrahtgewicht 30 kg und der Winkelzug 20 kp, so liegt das Pendel in einer Schieflage von etwas mehr als 30°. Bewegt sich nun ein Schleifkontakt gegen den Stützpunkt hin, so macht sich der Bügelaufdruck (6 bis 8 kp) immer mehr bemerkbar. Die Gewichtskomponente wird um das Mass des Anpressdruckes vermindert, was heisst, dass sich das Pendel elastisch anhebt.

Im Gegensatz dazu vermag der Fahrdraht an einem vertikalen Hängedraht (starrer Stützpunkt) erst dann nach oben auszufedern, wenn der Anpressdruck grösser ist als das Fahrdrahtgewicht. Ein so grosser Bügeldruck würde aber sowohl dem Fahrdraht als auch dem Schleifstück schaden.

Der Fahrdraht hängt zwischen zwei Stützpunkten parabelförmig durch. In der Mitte der Spannweite ist die Parabel flach und steigt gegen den Stützpunkt hin mehr und mehr an. Der Schleifkontakt muss dieser Bahn folgen und seine Höhenlage verändern, um am Draht zu bleiben. Ist bei einer starren Leitung die Vorwärtsgeschwindigkeit zu gross oder der Schleifkontakt in seiner Aufwärtsbewegung zu träge, so springt letzterer kurz vor dem Stützpunkt ab und prallt gleich darnach auf den absteigenden Fahrdraht des Nachbarspannfeldes. Der dabei entstehende Flammbogen und die

Tabelle 1. Technische Daten der Fahrleitung

Fahrdrahtspannung	600 V
Einspeisung	Station Waldhaus
Notspeisung	Römerhof, VBZ-Netz
Speisesektor 1	Römerhof–Waldhaus
Speisesektor 2	Waldhaus–Bergstation
Fahrdrahtquerschnitt	107 mm² Cu
Fahrdrahthöhen ab Schienenoberkante	
in Stationen	4,80 m
in offener Strecke	4,20 m
bei bestehenden Überbauten	3,30 m
Abstand Geleiseachse–Mastmitte	2,20 m
Tragwerke	Stahlprofile HE B 160
Ausleger	Stahlrohr 2″
Leitungs-System	Einfach windschiefe Aufhängung, nicht nachgespannt